乌珠穆沁沙地主要风沙环境特征及形成机制研究

张 昊[1]， 党晓宏[1,2,3]， 蒙仲举[1,2]， 高 永[1,4]， 刘 阳[5]， 秦青船[6]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站，内蒙古 鄂尔多斯 017400；3. 包头市林业和草原局，内蒙古 包头 014030；4. 中央与地方共建高校特色优势学科“风沙物理”重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；5. 内蒙古自治区水利科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010020；6. 东乌珠穆沁旗水利事业发展中心，内蒙古 锡林浩特 026300）

摘 要：厘清区域风沙运动环境和沉积物粒度特征是研究风沙流的关键，对地区风沙灾害的防护与治理具有重要意义。本文利用乌珠穆沁沙地的风况数据，研究沙地起沙风况和输沙势变化特征，同时结合沉积物粒径数据，揭示该地区风沙环境的空间分异规律。结果表明：（1）乌珠穆沁沙地年均起沙风频率为33.8%，平均风速介于3.34~5.40 $m\cdot s^{-1}$之间，平均起沙风速介于6.46~8.49 $m\cdot s^{-1}$之间，沙地起沙风频率和风速北部大于南部，西部大于东部。（2）沙地整体年内起沙风频率和风速春季最高，起沙风向以西南方向为主，WSW风向频率最高。（3）沙地输沙势为19.2~193.7 VU，整体属低风能环境，风况多为锐双峰风况，沙地输沙势北部大于南部，西部大于东部。全年沙物质整体向东、东北方向输移，春季是最主要的风沙活动期。（4）沙地整体以粗沙和中沙组分为主，南部和西部土壤粒径偏粗，东部偏细。沙地北部和东部沉积物分选性较差，粒径组分受外来影响较大。总体而言，沙地北部风沙活动最强，适宜人工建植或铺设沙障固沙。沙地东部栽植防护林，避免沙物质持续东移。

关键词：风况；输沙势；沉积物；空间差异；乌珠穆沁沙地

风沙灾害是近地层强风携带沙物质吹蚀地表，使其形态发生改变，形成各种风沙地貌，并对人类生产生活造成严重危害的自然过程[1]。在风沙灾害研究中，风沙运动是关键内容，地表风况受局部地形和气候影响，导致风沙运动具有明显的区域性特点。风沙运动影响地表沉积物系统的结构组成，而沉积物粒度特征也是反映风沙和沉积环境的重要指标之一[2-3]。因此，掌握区域风沙环境特征对研究地表风沙流具有重要意义。

在风沙运动研究中一般采用输沙势作为衡量区域风沙活动强度的指标[4]。输沙势代表区域内潜在最大风沙活动强度，具有统一的风沙运动环境评判标准，方便不同地区进行风能环境对比分析。如房彦杰[5]利用输沙势分析了塔克拉玛干沙漠风沙活动强度的时空变化特征，重点研究了输沙势的估算偏差；李志星等[6]发现，河北昌黎海岸沙丘向岸和离岸的输沙势总体呈衰减趋势，且风积沙丘的类型和走向受风动力影响。然而，单以输沙势评价风沙环境仍具有一定的局限性，未能充分考虑除风况以外的其他环境因素影响。表层沉积物特征是多种环境因素共同作用的结果，对区域风况和沉积环境具有重要指示作用[7]。将风能环境与地表沉积物特征相结合，有利于精准掌握野外风沙输移规律，提供更重要的科学参考意义[8]。

乌珠穆沁草地是锡林郭勒草原的重要组成部分[9]。自20世纪50年代以来，由于全球气候逐渐变暖以及人类垦荒和过度放牧等原因，造成草原发生严重退化，乌珠穆沁草地平均每年被风沙吞没的面积约1000 hm^2[10]，严重的草地沙化导致草地载蓄力持续减少，沙尘天气频繁发生，严重威胁区域居民生存与发展[11]。“三北”工程的工作重心以防沙治沙为主攻方向，内蒙古作为中国北方的重要生态屏障，具有突出的战略地位。乌珠穆沁沙地是京津冀地区沙尘暴的主要来源地之一。治理乌珠穆沁沙

收稿日期：2023-05-11； **修订日期**：2023-08-07
基金项目：内蒙古自治区科技计划“乌珠穆沁沙地生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”（2020GG0077）
作者简介：张昊（1999-），男，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治监测. E-mail: 1098228823@qq.com
通讯作者：党晓宏. E-mail: dangxiaohong1986@126.com

地，恢复天然草原，是筑牢北方生态安全屏障的必要前提，因此，乌珠穆沁沙地的防沙治沙工作刻不容缓。目前，针对乌珠穆沁沙地的研究主要集中在沙地景观格局[12]、土壤风蚀[13]以及土壤理化性质[14]和沙地植被等方面，而关于风沙环境特征研究较少。鉴于此，本文基于乌珠穆沁沙地周边气象站的数据资料，系统分析沙地起沙风况及输沙势特征，同时结合研究区地表沉积物粒径数据，研究揭示该地区风沙运动环境特点和沙尘迁移规律，研究结果丰富研究区风沙流研究内容，以期为今后乌珠穆沁沙地的区域环境特征分析和风沙灾害防治工作提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

乌珠穆沁沙地位于内蒙古锡林郭勒草原东部，行政区划属锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗（图1）。沙地呈西南宽、东北窄的扇形分布，海拔在835~1957 m之间，属中温带典型半干旱大陆性季风气候，长期受蒙古高压控制，自然环境较为恶劣，春季干寒风多，夏季短促干燥，秋季霜冻早，冬季寒冷漫长[15]；年平均气温1.6 ℃，极端最高温度37 ℃，极端最低温度−37.5 ℃；年降雨量700 mm左右，主要集中在7—8月；年平均风速3.8 m·s^{-1}，极端最大风速可达34.0 m·s^{-1}，年均8级风速以上天气73 d；主要土壤类型为栗钙土和黑钙土[12]。沙地植被呈地带性分布，东南部植被以贝加尔针茅（*Stipa baicalensis* Roshev）、线叶菊（*Filifolium sibiricum*）等杂类草群落为主，西北部植被以小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）、大针茅（*Stipa grandis*）、冷蒿（*Artemisia frigida* ）等群落为主。

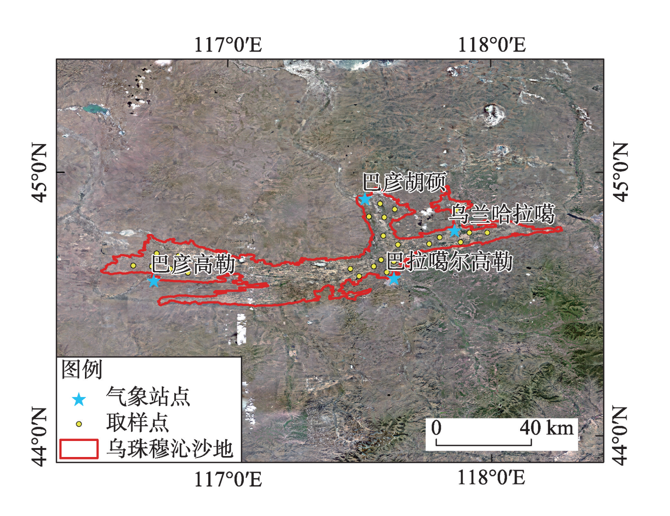


图1 乌珠穆沁沙地气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Wuzhumuqin Sandy Land

1.2 数据来源与处理

本文所采用的风况数据来源于乌珠穆沁沙地周边的巴拉嘎尔高勒镇、巴彦高勒镇、巴彦胡硕苏木、乌兰哈拉嘎苏木4个气象站点，分别代表沙地南、西、北、东4个方位的区域特征。数据记录时间范围为2017年1月1日至2021年12月31日。风况观测高度为10 m，每日从0:00开始，每间隔1 h记录1次，共记录24个定时观测的连续10 min的平均风速。参考相关研究[2,13,16]，乌珠穆沁沙地风速达到5 m·s^{-1}时，地面沙物质开始出现移动，故本文以5 m·s^{-1}作为地表沙粒移动的临界风速。首先将原始气象数据中所有风速大于5 m·s^{-1}的风况按照不同月份分别计算平均起沙风速、起沙风频率及最大风速。再将风向数据按照360°方位角平均分成N、NNE、NE、ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SSW、SW、WSW、W、WNW、NW和NNW 16个风向方位，分别计算不同方位的起沙风频率。输沙势的计算方法采用Fryberger等[17]提出的DP输沙势计算模型：

$$DP = V^2 \times (V - V_t) \times t$$

式中：DP代表输沙势，为矢量单位（VU）；V代表大于起沙风的风速（节，1节≈0.5 m·s^{-1}）；V_t代表起沙风速（节）；t代表观测时间范围内起沙风作用时间与总观测时间的百分比。合成输沙势（Resultant Drift Potential，简称RDP）是16个方位的输沙势矢量相加的结果，代表了一个地区风沙运动过程中净输沙能力的大小。合成输沙势方向（Resultant Drift Direction，简称RDD）代表了区域内沙物质的整体移动方向。根据Fryberger的风能环境划分方法可将研究区分为：低风能（DP＜200）、中风能（200≤DP＜400）、高风能（DP≥400）三种不同的风能环境。Fryberger还提出可以通过风向变率指数（RDP/DP）来反映起沙风的复杂程度，风向变率指数与起沙风风向组合情况呈反比，当RDP/DP＜0.3时，为高风向变率，一般为复杂风况；当0.3≤RDP/DP≤0.8时，为中风向变率，一般为钝双峰或锐双峰风况；当RDP/DP＞0.8时，为低风向变率，风向较为单一，一般为对应窄单峰或宽单峰风况。将起沙风速组合以及输沙势结果绘制成玫瑰图，能够简单直观的分析各自的变化

情况。

沉积物表层样品取自乌珠穆沁沙地不同方位，取样时间为2023年4—5月，该时段草地生长状况较差，可以避免地表植被对土壤粒径的影响。分别在不同方位选取6个地势平坦的样地进行取样，取样点间隔约4 km，每个取样点随机采取4个范围为20 cm×20 cm，深度为0~3 cm的表层沙土样品500 g，采集范围基本代表乌珠穆沁沙地东、西、南、北4个方位的主要区域。利用Mastersizer 2000激光粒度仪测得每个土样的沉积物组分体积百分比，每个土样测3次，取其平均值。为方便辨析，将每个取样点的4个土壤数据结果进行算术平均，来表征该地的沉积物组分特征，同时根据Folk-Ward公式[18]计算沉积物的平均粒径M_z、分选系数σ、偏度SK等参数。

2　结果与分析

2.1　起沙风特征

乌珠穆沁沙地整体起沙风频率为33.8%，受海拔高度及地表植被盖度等影响，沙地起沙风具有明显的空间分布差异。如图2所示，北部和西部起沙风频率较大，东部和南部相对较小。巴拉噶尔高勒镇、巴彦高勒镇、巴彦胡硕苏木、乌兰哈拉噶苏木的年起沙风频率分别为21.4%、37.5%、48.0%、28.6%。年内各月起沙风频率具有相同的变化趋势，均呈现2—5月递增，6—8月递减，8至翌年1月递增的趋势，各地最大起沙风频率集中在4—5月，且均以春季起沙风频率最高。

乌珠穆沁沙地年平均风速为3.34~5.40 m·s^{-1}、年平均起沙风速为6.46~8.49 m·s^{-1}。各地平均起沙风速和起沙风频率具有相同的区域分布特点，西部和北部平均起沙风速较大，总体变幅较大，南部和东部平均起沙风速相对较小，风速差值相对较小(图3)。巴拉噶尔高勒镇、巴彦高勒镇、巴彦胡硕苏木、乌兰哈拉噶苏木的年均起沙风速为6.46 m·s^{-1}、7.62 m·s^{-1}、8.49 m·s^{-1}、6.94 m·s^{-1}。各地年内月平均起沙风速呈现同增共减的趋势，最大平均起沙风速与最大起沙风频率特征一致，最大值仍集中在4—5月，且均以春季平均起沙风速最大。

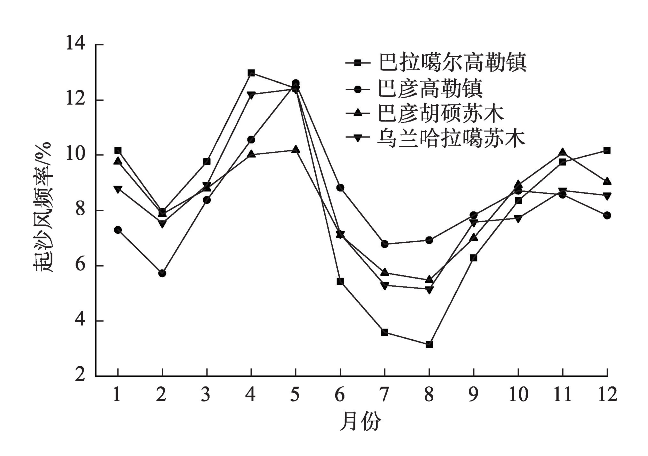


图2　乌珠穆沁沙地起沙风频率月均变化

Fig. 2　Monthly mean variation of sand-blowing wind frequency in Wuzhumuqin Sandy Land

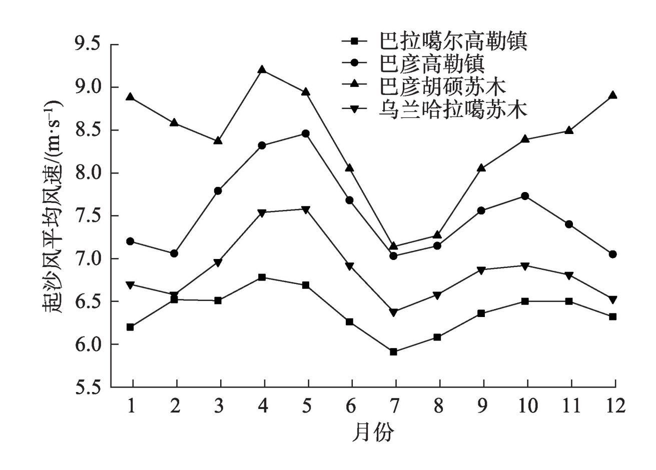


图3　乌珠穆沁沙地平均起沙风速月均变化

Fig. 3　Monthly average variation of average wind speed of sand rising in Wuzhumuqin Sandy Land

从起沙风风向特征来看(表1和图4)，乌珠穆沁沙地主要受西南风向影响，不同区域均以WSW风向频率最高。巴拉噶尔高勒镇以偏西风为主(WSW、SW、W、WNW)，频率为69.0%。其次为偏北风(NW)和偏南风(SSW、S)，频率依次为8.8%、13.2%。巴彦高勒镇与巴拉噶尔高勒镇风向结构一致，以偏西风为主(WSW、SW、W、WNW)，频率为59.1%，其次为偏北风(NNW、NW、N)，频率为20.0%。巴彦胡硕苏木亦以偏西风为主(WSW、W、SW、WNW)，频率为63.7%，偏北风次之(NW、NNW)，频率为17.1%。乌兰哈拉噶苏木同样以偏西风为主(WSW、WNW、NW、W)，频率为56.7%，其次为偏南风(SW、SSE、S)，频率为25.1%。

如图5所示，巴拉噶尔高勒镇春季起沙风与年起沙风风向结构相似，以偏西风为主(SW、NW、WSW、WNW、W)，频率为71.2%。夏季以偏南风为主(S、SW、SSW、SSE)，频率为54.6%。秋季与春季一致，以偏西风为主(WSW、SW、WNW、W)，频率为

表1 乌珠穆沁沙地各区域主风向分布

Tab. 1 Distribution of main wind directions in different regions of Wuzhumuqin Sandy Land

		巴拉噶尔高勒镇	巴彦高勒镇	巴彦胡硕苏木	乌兰哈拉噶苏木
年	主风向	WSW、SW、W、WNW	WSW、SW、W、WNW	WSW、W、SW、WNW	WSW、WNW、NW、W
	频率/%	69.0	59.1	63.7	56.7
春季	主风向	SW、NW、WSW、WNW、W	WNW、WSW、W、SW、NW	NW、WSW、W、SW、WNW	NW、WSW、WNW、W
	频率/%	71.2	55.5	63.0	53.1
夏季	主风向	S、SW、SSW、SSE	WSW、SW、W、SSW	SW、WSW、SSE、S	SSE、S、SE
	频率/%	54.6	43.6	43.6	38.4
秋季	主风向	WSW、SW、WNW、W	WSW、SW、W	WSW、SW、W、WNW、NW	WSW、WNW、NW、W、SW
	频率/%	74.5	53.7	80.2	72.2
冬季	主风向	WSW、W、SW	WSW、SW、W	WSW、W、SW	WSW、SW
	频率/%	79.8	75.9	77.3	62.5

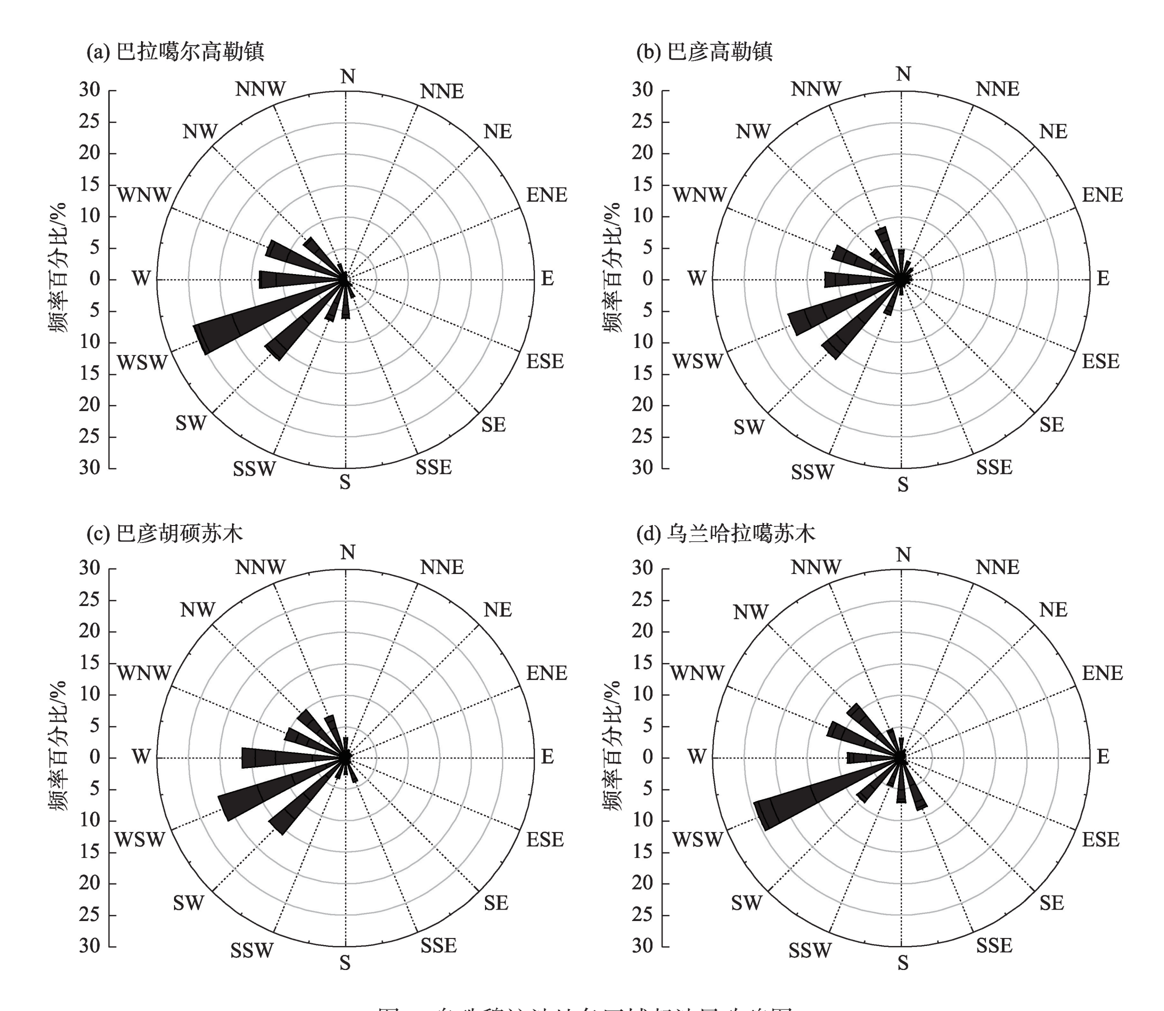


图4 乌珠穆沁沙地各区域起沙风玫瑰图

Fig. 4 Rose chart of sanding wind in different regions of Wuzhumuqin Sandy Land

74.5%。冬季以西南风为主(WSW、W、SW),频率为79.8%。巴彦高勒镇春季以偏西风为主(WNW、WSW、W、SW、NW),频率为55.5%。夏季以西南风向为主(WSW、SW、W、SSW),频率为43.6%。秋季与夏季相似,以西南风向为主(WSW、SW、W),频率为53.7%。冬季以西南风向为主(WSW、SW、W),频率为75.9%。

巴彦胡硕苏木春季起沙风以偏西风向为主(NW、WSW、W、SW、WNW),频率为63.0%。夏季以偏南风向为主(SW、WSW、SSE、S)频率为43.6%。

图5　乌珠穆沁沙地各区域季节起沙风玫瑰图

Fig. 5　Rose chart of seasonal sand wind in different regions of Wuzhumuqin Sandy Land

秋季以偏西风向为主(WSW、SW、W、WNW、NW),频率为80.2%。冬季以西偏南风(WSW、W、SW)为主,频率为77.3%。乌兰哈拉噶苏木春季起沙风以偏西为主(NW、WSW、WNW、W),频率为53.1%。夏季以偏南风(SSE、S、SE)为主,频率为38.4%。秋季起沙风亦以偏西风为主(WSW、WNW、NW、W、SW),频率为72.2%,冬季起沙风主要集中在西南方向(WSW、SW),频率为62.5%。

总体来看,乌珠穆沁沙地各地春季和秋季起沙风均以偏西风向为主,夏季起沙风除乌兰哈拉噶苏木以南偏东风为主,其余地区均以西南风向为主,冬季整体起沙风向结构简单,多以西偏东风及部分西风为主。

2.2　输沙势特征

乌珠穆沁沙地整体属于低风能环境(图6),巴拉噶尔高勒镇、巴彦高勒镇、巴彦胡硕苏木、乌兰哈拉噶苏木的年均输沙势分别为19.2 VU、98.7 VU、193.7 VU、41.7 VU,合成输沙势分别为14.8 VU、

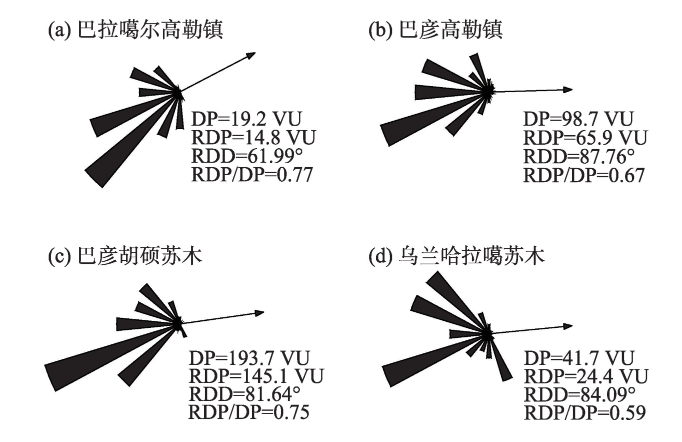


图6　乌珠穆沁沙地各区域输沙势玫瑰图

Fig. 6　Rose chart of sediment transport potential in different regions of Wuzhumuqin Sandy Land

65.9 VU、145.1 VU、24.4 VU,沙地北部和西部输沙势较大,南部和东部较小。各地风向变率指数均介于0.3~0.8之间,属于中风向变率,风况多为锐双峰风况,全年沙物质整体向东、东北方向输移。巴彦高勒镇、巴彦胡硕苏木、乌兰哈拉噶苏木的合成输

沙方向相近，为85°±5°，巴拉噶尔高勒镇合成输沙方向为61.99°，不同地区均以西南和西北方向为主要的输沙来源。

从乌珠穆沁沙地不同地区风沙活动强度的时间尺度上来看(图7)，巴拉噶尔高勒镇年内合成输沙方向集中在东北方向，春季风沙活动强度最强，输沙势为8.3 VU，夏季风沙活动强度最弱，输沙势为1.5 VU。秋、冬两季一致，输沙势均为4.7 VU。春、夏两季属中风向变率，秋、冬两季为低风向变率。巴彦高勒镇除春季合成输沙方向集中在东南方向，其余三季均集中在东北方向。春季是最主要的风沙活动期，输沙势为44.7 VU，冬季风沙活动强度最弱，输沙势为12.8 VU，夏季和秋季输沙势分别为17.2 VU和24.0 VU。除冬季属低风向变率，其余三季均为中风向变率。巴彦胡硕苏木年内输沙势特征与巴彦高勒镇一致，同样以春季输沙势最高，为67.2 VU，合成输沙方向为东南方向，其余三季为东北方向。夏季是风沙活动衰弱期，输沙势为20.5 VU，秋季和冬季输沙势分别为46.2 VU和59.8 VU。春季和夏季是中风向变率，秋季和冬季是低风向变率。乌兰哈拉噶苏木春、夏、秋季均属中风向变率，冬季为低风向变率。其中，春季输沙势年内最高，为20.1 VU，合成输沙方向为东南方向，夏季输沙势最小，为5.3 VU，合成输沙方向为东北方向，秋季和冬季输沙势分别为9.4 VU和6.9 VU，合成输沙方向均为东北方向。

总体而言，同一时期内乌珠穆沁沙地南部输沙势最低，北部最高，西部大于东部。不同地区均以春季输沙势最大，年内合成输沙势方向均集中在东北、东南方向，且春季和夏季均属于中风向变率，冬季为低风向变率。

2.3 土壤粒径特征

如图8所示，巴彦高勒镇、巴拉噶尔高勒镇和巴彦胡硕苏木的沉积物粒径曲线均呈现不对称的双峰分布，主次峰相差较大，主峰均位于735~965 μm，属粗沙组分。巴彦高勒和巴拉噶尔高勒次峰位于250~365 μm，属中沙组分。巴彦胡硕次峰位于110~375 μm，为细沙和中沙混合组分。乌兰哈拉噶苏木沉积物粒径曲线呈不对称的单峰分布，峰值位于250~450 μm，属中沙组分。整体来看，乌珠穆沁沙

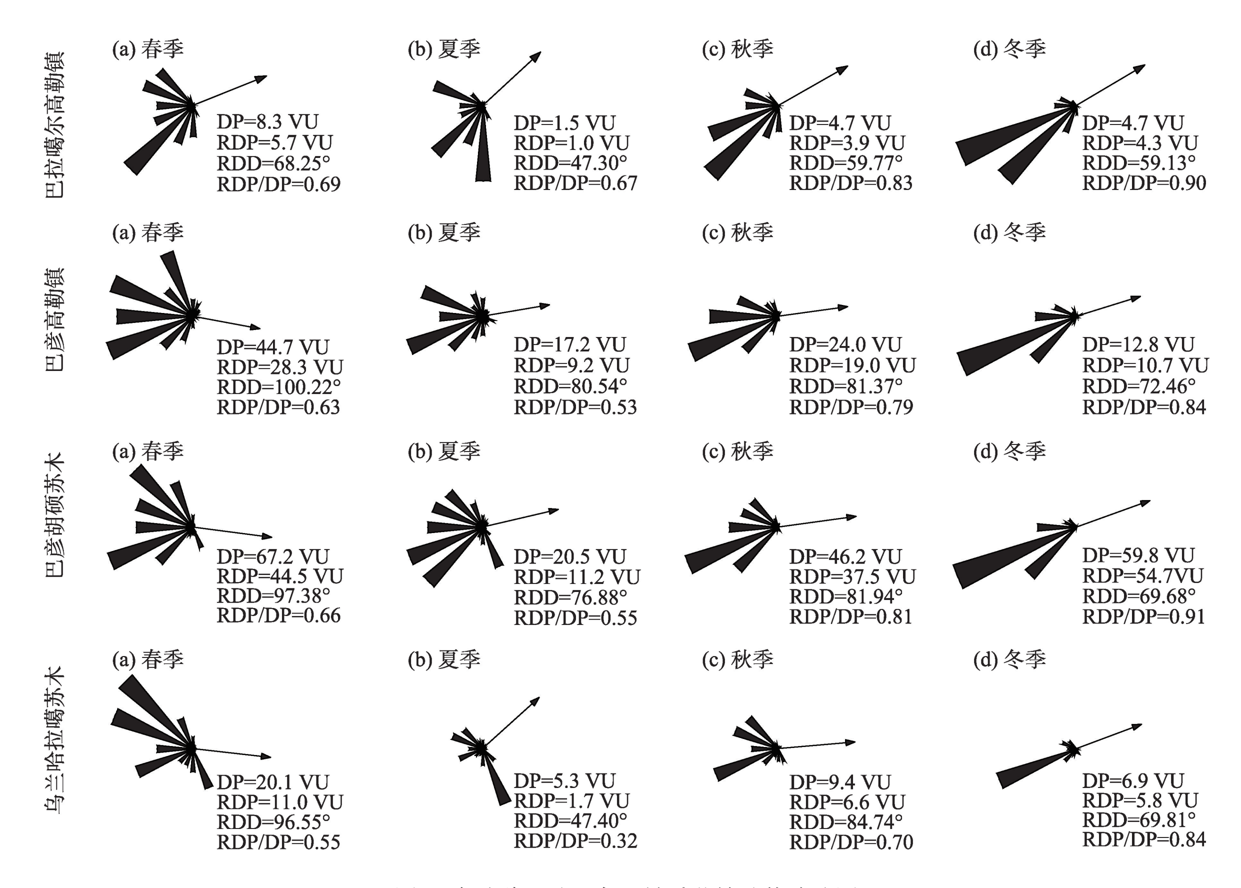


图7 乌珠穆沁沙地各区域季节输沙势玫瑰图

Fig. 7 Rose chart of seasonal sediment transport potential in different regions of Wuzhumuqin Sandy Land

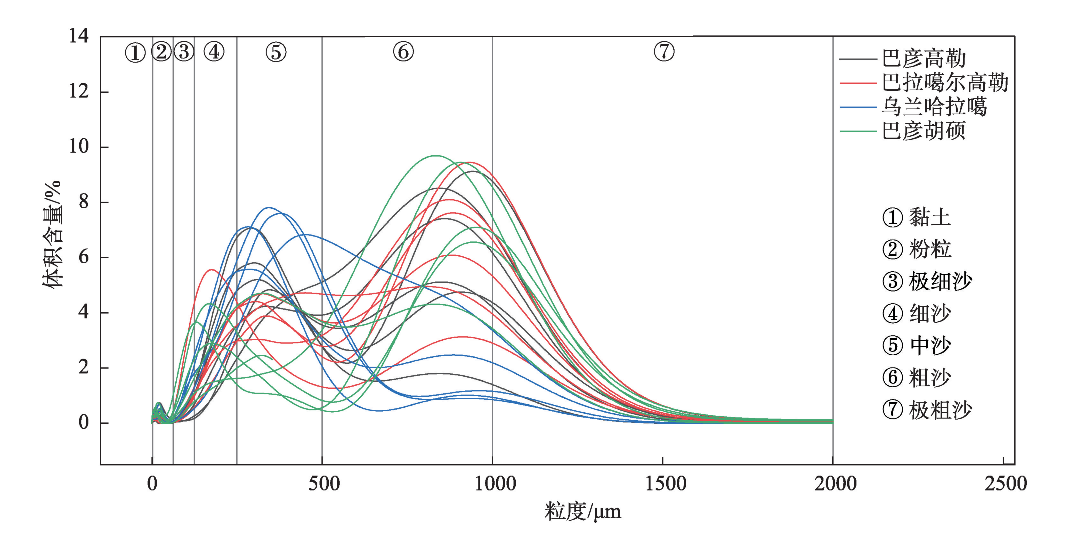


图8　乌珠穆沁沙地各区域沉积物粒径曲线

Fig. 8　Sediment particle size curves in different regions of Wuzhumuqin Sandy Land

地不同区域的沉积物沙粒粗细度分布不均,西部、北部、南部沙物质粒级较复杂,粒径偏粗,东部沙粒较细,粗细度相对集中。

由表2可知,巴拉噶尔高勒镇主要以粗沙为主,占样品总量的30.8%,其次为细沙和中沙,分别占26.7%和25.3%,黏土和极细沙含量较低,仅为1.6%和1.9%。巴彦高勒镇以粗沙和中沙为主,分别占36.4%和31.0%,其次为细沙,占17.8%,粉粒、黏土和极细沙的含量均不高,合计占7.4%。巴彦胡硕苏木以粗沙组分为主,占35.0%,其次为细沙和中沙,占比分别为23.5%和16.6%。极细沙和黏土占比最少,分别为3.5%和2.0%。乌兰哈嘎苏木以中沙为主,占比38.3%,其次为粗沙和细沙,占比分别为25.6%和22.3%,极细沙、极粗沙和黏土占比最少,合计占6.4%。整体来看,乌珠穆沁沙地整体地表层物质以粗沙和中沙为主,其次为细沙、粉粒和极粗沙含量较少,黏土和极细沙含量最低。结合沉积物粒度参数特点来看,研究区不同区域的平均粒径为0.74~2.60 Φ,均值为1.41 Φ,参照Wentworth粒度分级标准[19],沙地整体优势粒径颗粒较粗。研究区沉积物粒径分选系数为0.90~2.51 Φ,均值为1.55 Φ,整体沉积物分选性较差,其中,乌兰哈拉噶地区分选系数最大,分选性最差,说明该地区沙物质组分较为复杂,是沙物质聚集的结果。同时,研究区沙

表2　乌珠穆沁沙地各区域粒径组分含量与参数

Tab. 2　Content and parameters of particle size components in Wuzhumuqin Sandy Land

采样位置		粒径组分含量/%							粒径参数		
		黏土 <3.1 μm	粉粒 3.1~63 μm	极细沙 63~125 μm	细沙 125~250 μm	中沙 250~500 μm	粗沙 500~1000 μm	极粗沙 1000~2000 μm	M_z	σ	SK
巴拉噶尔高勒	最大值	2.5	8.8	4.4	46.9	32.8	4.4	13.6	2.13	1.87	0.58
	最小值	0.8	3.1	0.7	13.0	16.6	6.5	1.6	0.89	1.10	0.06
	均值	1.6	6.0	1.9	26.7	25.3	30.8	7.7	1.38	1.54	0.32
巴彦高勒	最大值	2.8	13.1	1.1	31.9	38.6	50.6	13.4	2.12	1.76	0.48
	最小值	0.4	2.8	0.3	8.4	28.3	11.8	1.3	0.77	0.96	0.06
	均值	1.3	5.5	0.6	17.8	31.0	36.4	7.4	1.17	1.33	0.33
巴彦胡硕	最大值	2.9	15.2	7.3	36.7	30.5	53.6	18.2	2.41	1.93	0.78
	最小值	1.6	7.1	1.0	11.3	6.5	26.0	4.0	0.98	0.90	0.08
	均值	2.0	9.6	3.5	23.5	16.6	35.0	9.6	1.51	1.40	0.44
乌兰哈拉噶	最大值	2.8	13.6	2.6	37.9	48.6	56.5	6.5	2.60	2.51	0.58
	最小值	1.1	3.4	0.4	5.8	26.3	5.5	1.8	0.74	1.71	0.28
	均值	1.6	7.4	1.5	22.3	38.3	25.6	3.3	1.57	1.94	0.40

粒偏度的变化范围在0.06~0.78,均值为0.37,整体以极正偏态为主,沙地东部和北部偏度值较高,说明该地区风沙搬运能力相对较强,沉积物外来组分偏多,再次印证了在风沙运动过程中,沙物质整体向东、东北方向迁移。

3 讨 论

从研究结果来看,乌珠穆沁沙地整体西南风向发生频率最高,主要原因是受地形因素影响。研究区南部多为山地丘陵,北部为荒漠草原,地势呈东南向西北倾斜,受蒙古气旋影响,高空低槽自西向东移动,气流受到山丘影响呈西南走向,从而导致研究区盛行西南风。另外,地表植被的空间差异性也是导致风能环境区域特点的主要原因之一。繁茂的植物不仅可以降低风速,还可以增大地表沙粒的启动风速,从而减少沙尘天气的发生频率[20]。根据已有研究结果表明[12],乌珠穆沁沙地西部和北部的植被覆盖度偏低,防风固沙效果较差,而东部和南部植被状况良好,且近几年植被盖度有持续增加的趋势,从而导致沙地整体风能环境为西北高,东南低。

研究区的主要风沙运动活跃期集中在3—5月,此时正值春季,空气温度寒冷干燥,植物尚未返青,地表基本呈裸露状态。结合降雨数据来看,春季降雨量仅占年降雨量的1.2%,而同期蒸发量却远超降雨量,使得该时期的土壤水分得不到充分的补充,土壤呈干旱疏松状,在强风作用下极易发生风力侵蚀。夏季降雨量占年降雨量的54.0%,降雨增加能够有效降低风沙运动的强度,而风季和雨季在时间上的差异会加剧该地区风沙灾害的强度及发生频率,导致研究区春季是沙尘暴的频发时期。

乌珠穆沁沙地输沙势为19.2~193.7 VU,与周边的浑善达克沙地(36.9~174.8 VU)[21]均属于低风能环境,且合成输沙方向都集中在东偏北方向。不同于浑善达克沙地的是,乌珠穆沁沙地的形成是由于锡林郭勒草原近年来人口急剧增长和过度放牧超过了草场的自然更新速度,导致草场出现“斑秃”,形成大量分散不连片的斑块状沙地,这种退化作用是相对缓慢的。而浑善达克沙地至少形成于晚第三纪,是天然的荒漠化环境[22]。退化草地治理比裸沙地修复具有天然的优势条件[23],草地退化修复过程可以逐渐改善土壤的理化性质,最终使退化草地生态系统由碳源转向碳汇[24],从而增大植被恢复后土壤的固碳潜力,草地碳储量的提升有助于区域内的气候调节,促进原生草场的生长,从而使草地退化得到快速恢复,而过度退化则会加速草地碳库的损失,破坏草地土壤有机碳的恢复和积累,影响草原的自然演替进程[25]。因此,要及时遏制乌珠穆沁草原的退化趋势,避免沙地面积进一步扩张。

沉积物粒度参数是追溯沙源背景的重要判别标准,研究沉积物粒度特征及其分异规律,有助于辨别地表沙物质来源和探讨风沙流的运动机制[26]。乌珠穆沁沙地不同地区的沉积物粒径变化存在显著差异,沙地整体沉积物粒径偏粗,说明地表大量细颗粒在风力作用下随风迁移,导致粒径组分多以粗沙、中沙为主。粗沙组分较多表明研究区搬运介质的动能不高,整体属于弱风能环境。在风沙运动过程中,粉粒是沙尘暴中可远距离搬运的细粒组分。细沙和中沙是风沙运动的活动主体,也是沙物质的跃移组分。巴拉噶尔高勒镇和巴彦高勒镇的粉粒含量低于巴彦胡硕苏木和乌兰哈拉噶苏木,主要原因是受高频率的起沙风天气影响,在风力搬运作用下,沙地南部和西部沉积物粉粒发生大量迁移。而沙地北部由于受到高强度的风沙运动吹蚀,使得地表受到持续侵蚀,导致土壤粉粒含量增多。沙地东部粗沙和极粗沙含量较低,细沙和中沙含量偏高,占合计总量的60.6%,整体沉积物粒度偏细,粗细度相对集中,且沙物质分选性差,组分较为复杂,结合研究区风况和输沙势特点来看,在高频率的西南风向影响下,沙地大量细沙组分在风力作用下向东、东北输移,导致研究区东部内部跃移物质在运动过程中不断积累,向东迁移,使得沙区东部沉积物外来组分偏多。

乌珠穆沁沙地总体处于固定、半固定沙地状态,沙化程度较轻,但土地沙化的趋势也比较明显[27]。如果不加以防治,势必会造成草地进一步退化、沙化。因此,针对乌珠穆沁沙地的防风固沙系统设计,要做到因地制宜,以恢复沙地北部生态环境为重点,采用人工播种、围栏禁牧等措施快速恢复草原植被。根据苏日古嘎的研究发现[28],西乌珠穆沁草原地区小叶锦鸡儿灌丛化程度加重会导致黏粒、粉粒、极细沙含量减少,而细沙、中沙、粗沙含量增加。结合研究区土壤粒径分布特征,沙地北部适宜种植大量小叶锦鸡儿以减少粉粒等沙尘飞扬,同时

防止裸沙地表遭受高强度风力侵蚀。另外,可在严重沙化地区铺设适宜的机械沙障,增加地表粗糙度,降低风速以减弱风蚀强度,减缓沙地面积进一步扩大。朱泊年等[9]通过在乌珠穆沁沙地南部铺设PLA沙障发现,PLA沙障能明显降低地表风速,2 m×2 m规格防风固沙效果最佳,适宜布设在沙地北部及西部等沙化程度较重,植被恢复困难的沙区。同时,应在沙地东部栽植与输沙势方向垂直的防护林,加强东部地区防风固沙的能力,防止沙物质持续向东输移,避免破坏东部优良草场。选取优势草种对沙地严重退化地区进行人为干预,在乌珠穆沁沙地生态脆弱区,形成以流沙快速固定与植被稳定恢复为核心的治理技术体系,为我国沙化天然草地快速恢复与综合高效治理提供科学依据。

研究地表风沙活动强度和沉积物粒度特征是研究区域风沙环境的关键内容[29]。评价区域风沙活动强度不仅需要对风速、风向数据进行分析,还应进行野外实测风沙流,同时考虑地形地貌、植被盖度等环境因素对风沙活动的影响[30]。本文只考虑了乌珠穆沁沙地风况、输沙势及输沙方向,缺少长期陆地观测数据和对环境因素的考量。另外,本文土壤取样时间为春季,沙地植被状况仍处于较低水平,忽略了植被盖度对土壤粒径的分选作用,且沙地腹地取样点较少,土壤样品在空间部分上具有一定的局限性。因此,在今后的研究中,应重点考虑环境因素对风沙环境的影响作用,将气象要素与野外实测风沙流相结合,同时丰富地表沉积物组分数据,综合考虑区域风沙活动强度与沉积环境特征,深入研究风沙环境的成因机制,以期为乌珠穆沁沙地风沙灾害防治与生态环境修复提供科学依据。

4 结 论

(1) 乌珠穆沁沙地年均起沙风频率为33.8%,平均风速3.34~5.40 $m \cdot s^{-1}$,平均起沙风速6.46~8.49 $m \cdot s^{-1}$,沙地北部和西部起沙风频率和风速较高,南部和东部相对较低。不同地区均以春季最高,年内起沙风向以西南方向为主,WSW方向发生频率最高。

(2) 沙地年均输沙势为19.2~193.7 VU,整体属于低风能环境,风况多为锐双峰风况。沙地北部及西部输沙势较大,南部和东部相对较小。南部和北部以西南方向为主要输沙来源,西部和东部以西南和西北方向为主,沙物质整体向东、东北方向输移,不同地区均以春季输沙势最大。

(3) 沙地整体表层物质以粗沙和中沙为主,西部和南部粒径组分偏粗,东部偏细,且东部地区土壤分选性最差,东部和北部均以极偏正态为主,外来组分偏多,印证了研究区的沙物质整体向东、东北方向聚集。

(4) 结合研究区风沙环境特征分析,沙地北部风沙活动最强,起沙条件充足,适宜进行人工建植或铺设沙障等人为干预活动,减缓地表风蚀进程,快速恢复草原植被。同时,应在沙地东部栽植与输沙势方向垂直的防护林,避免沙物质持续东移。

参考文献(References):

[1] 刘洪涛. 长途迁徙的环境杀手——沙尘暴[J]. 地球, 2004(3): 9-10. [Liu Hongtao. Environmental killer of long distance migration-sandstorm[J]. Earth, 2004(3): 9-10.]

[2] 陈宗颜, 董治宝, 汪青春, 等. 柴达木盆地风况及输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 195-203. [Chen Zongyan, Dong Zhibao, Wang Qingchun, et al. Characteristics of wind regime and sand drift potential in Qaidam Basin of China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 195-203.]

[3] 梁晓磊, 牛清河, 安志山, 等. 甘肃瓜州锁阳城南雅丹地貌区起沙风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 48-55. [Liang Xiaolei, Niu Qinghe, An Zhishan, et al. Sand-driving wind regime and sand drift potential in the Yardang landform areas of Southern Suoyang Town, Guazhou, Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 48-55.]

[4] 张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 敦煌鸣沙山月牙泉景区风沙环境分析[J].中国沙漠, 2012, 32(4): 896-900. [Zhang Kecun, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Analysis of wind-blown sand environment in the singing sand mountain & crescent moon spring scenic spot in Dunhuang, China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 896-900.]

[5] 房彦杰. 基于Fryberger方法的塔克拉玛干沙漠输沙势时空分布特征分析[D]. 成都: 四川师范大学, 2015. [Fang Yanjie. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Sand Drift Potential in Taklimakan Desert Based on the 'Fryberger' Method[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2015.]

[6] 李志星, 李志忠, 靳建辉, 等. 2008—2018年河北昌黎海岸输沙势时空变化与沙丘形态演变[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 94-105. [Li Zhixing, Li Zhizhong, Jin Jianhui, et al. Spatial-temporal variation of drift potential and dune morphology evolution during 2008-2018 in Changli coast of Hebei, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3): 94-105.]

[7] 张克存, 安志山, 何明珠, 等. 乌海至玛沁高速公路中卫段风沙环境特征及沙害防治[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 983-991. [Zhang Kecun, An Zhishan, He Mingzhu, et al. Aeolian sand environments and disaster prevention along Zhongwei section of the Wuhai- Maqin Highway[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 983-991.]

[8] 王金国, 安志山, 张克存, 等. 乌玛高速公路中卫段风沙环境及输移规律[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 183-189. [Wang Jinguo, An Zhishan, Zhang Kecun, et al. Surface sand grain characteristics along Zhongwei Section of Wuhai-Maqin Highway[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 183-189.]

[9] 朱泊年, 党晓宏, 蒙仲举, 等. 乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障防风固沙效益[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 431-437. [Zhu Bonian, Dang Xiaohong, Meng Zhongju, et al. Effects of biodegradable poly lactic acid (PLA) sand barrier on wind prevention and sand fixation in the Urumqin Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 431-437.]

[10] 高晓杰, 陈晓梅, 韩忆军. 乌珠穆沁草原气候变化与沙尘暴趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 266-268. [Gao Xiaojie, Chen Xiaomei, Han Yijun. Analysis of climate change and sandstorm trends in the Uzhumuqin Grassland[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 266-268.]

[11] 曹子龙. 内蒙古中东部沙化草地植被恢复若干基础问题的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Cao Zilong. Basic Studies on Vegetation Restoration of Desertification Grassland in Mid-Eastern Inner Mongolia[D]. Bejing: Beijing Forestry University, 2007.]

[12] 黄海广, 韩兆恩, 党晓宏, 等. 基于3S技术的乌珠穆沁沙地近20 a动态变化特征[J]. 内蒙古林业科技, 2021, 47(4): 13-18. [Huang Haiguang, Han Zhao'en, Dang Xiaohong, et al. Dynamic change characteristics of Ujimqin Sandy Land during recent 20 years based on 3S technology[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2021, 47(4): 13-18.]

[13] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于RWEQ的20世纪90年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 825-834. [Gong Guoli, Liu Jiyuan, Shao Quanqin. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation[J]. Progress in Geography, 2014, 33(6): 825-834.]

[14] 姜艳丰, 王炜, 王立新, 等. 内蒙古西乌珠穆沁旗伏沙地土壤环境粒度特征分析[J]. 内蒙古环境科学, 2007, 19(3): 65-67. [Jiang Yanfeng, Wang Wei, Wang Lixin, et al. Analysis of soil environmental grain size characteristics in the underlying sandy land of Xiwuzhumuqin Banner, Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Environmental Science, 2007, 19(3): 65-67.]

[15] 侯健. 内蒙古乌珠穆沁盆地伏沙地的成因及其分布范围的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010. [Hou Jian. The Study of The Causes and Distribution of Sinking Sandy Land in Inner Mongolia Wuzhumuqin Basin[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010.]

[16] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 38-39. [Wu Zheng. Aeolian Geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 38-39.]

[17] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime[C]//Mckee E D. A Study of Global Sand Seas Washington: United States Government Printing Office, 1979: 137-169.

[18] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.

[19] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. The Geological Society of America Bulletin, 1914, 25(1): 655-744.

[20] 邢文娟, 雷加强, 王海峰, 等. 荒漠-绿洲过渡带风况及输沙势分析——以策勒县为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 894-898. [Xing Wenjuan, Lei Jiaqiang, Wang Haifeng, et al. Analysis on wind regime and wind borne sand potential in a desert-oasis ecotone: A case study in Qira County, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(6): 894-898.]

[21] 周炎广, 王卓然, 青达木尼, 等. 浑善达克沙地固定沙丘风蚀坑形态变化及其动力学机制[J]. 科学通报, 2023, 68(11): 1298-1311. [Zhou Yanguang, Wang Zhuoran, Qing Damuni, et al. Morphological changes and dynamic mechanism of blowouts on fixed dunes in the Otingdag Sandy Land, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(11): 1298-1311.]

[22] 赵媛媛, 武海岩, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 101-111. [Zhao Yuanyuan, Wu Haiyan, Ding Guodong, et al. A review on the aeolian desertification in the Otindag Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 101-111.]

[23] 白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3): 261-264. [Bai Yongfei, Chen Shiping. Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: Stock, rate and potential[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(3): 261-264.]

[24] 王文颖, 王启基, 王刚, 等. 高寒草甸土地退化及其恢复重建对植被碳、氮含量的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1073-1078. [Wang Wenying, Wang Qiji, Wang Gang, et al. Effects of land degradation and rehabilition on vegetation carbon and nitrogen content of alpine meadow in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(6): 1073-1078.]

[25] 韩维峥. 吉林西部草地退化恢复与碳收支的耦合研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011. [Han Weizheng. Coupling Analysis on Restoration of the Degraded Grassland Ecosystem and Carbon Budget in Western Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2011.]

[26] 宋洁, 春喜, 白雪梅, 等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 597-603. [Song Jie, Chun Xi, Bai Xuemei, et al. Review of grain size analysis in China desert[J]. Jounal of Desert Research, 2016, 36(3): 597-603.]

[27] 庞立东, 刘桂香. 近二十年内蒙古西乌珠穆沁草原景观结构变化及驱动力浅析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 155-160. [Pang Lidong, Liu Guixiang. Grassland landscape structure change and its driving factors during past twenty years in Xiwuzhumuqin, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and En-

vironment, 2010, 24(10): 155-160.]

[28] 苏日古嘎, 通嘎拉, 刘素军. 西乌珠穆沁旗草原灌丛化群落对土壤粒径的响应研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2020, 49(4): 320-326. [Suriguga, Tonggala, Liu Sujun. Research on the response of grassland thicketization to soil particle size in West Ujimqin Banner[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2020, 49(4): 320-326.]

[29] Blott S J, Pye K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(11): 1237-1248.

[30] 孙佳琦. 巴丹吉林沙漠地区风况与风能环境观测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Sun Jiaqi. Wind Regime and Drift Potential in the Badain Jaran Desert Based Observation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]

Study on main aeolian sand environment characteristics and formation mechanism in Wuzhumuqin Sandy Land

ZHANG Hao[1], DANG Xiaohong[1,2,3], MENG Zhongju[1,2], GAO Yong[1,4], LIU Yang[5], QIN Qingchuan[6]

(1. School of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. National Positioning and Observation Research Station of Hangjin Desert Ecosystem, Ordos 017400, Inner Mongolia, China; 3. Baotou Forestry and Grassland Bureau, Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 4. Key Laboratory of "Sandstorm Physics", A Characteristic and Advantageous Discipline Jointly Built by the Central and Local Governments, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 5. Research Institute of Water Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 6. Dongwuzhumuqin Banner Water Conservancy Development Center, Xilinhot 026300, Inner Mongolia, China)

Abstract: Mastering the regional wind sand movement environment and sediment particle size characteristics is the key to studying wind sand flow, and is of great significance for the prevention and recovery of regional wind sand disasters. Based on the wind regime data of Wuzhumuqin Sandy Land, this paper studies the variation characteristics of sand driving wind regime and sand transport potential, and reveals the spatial differences of sand environment in this area by combining with the sediment particle size data. The results show that:(1) The annual average frequency of sand blowing in the Wuzhumuqin sandy land is 33.8%, with an average wind speed of 3.34-5.40 $m\cdot s^{-1}$, and an average sand blowing wind speed of 6.46-8.49 $m\cdot s^{-1}$. The frequency and wind speed of sand blowing in the north of the sandy land are greater than those in the south, and those in the west are greater than those in the east. (2) The overall annual frequency and wind speed of sand storms are the highest in spring. The wind direction of sand storms is mainly in the southwest direction, and the frequency in the WSW direction is the highest. (3) The sand transport potential in the sandy land is 19.2-193.7 VU, which is generally a low wind energy environment. The wind conditions are mostly sharp bimodal wind conditions. The sand transport potential in the north of the sandy land is greater than that in the south, and that in the west is greater than that in the east. Throughout the year, sand material is transported to the east and northeast, and spring is the most important period of wind sand activity. (4) The sandy land is mainly composed of coarse and medium sand components, with soil particle sizes in the south and west being coarser and finer in the east. The sorting of sediment in the northern and eastern parts of the sandy land is poor, and the particle size components are greatly influenced by external factors. Overall, the sandstorm activity in the northern part of the sandy land is the strongest, making it suitable for artificial planting or laying sand barriers to fix sand. Protection forest is planted in the east of the sandy land to avoid the continuous eastward movement of sand.

Keywords: wind conditions; sediment transport potential; sediments; spatial differences; Wuzhumuqin Sandy Land